

# 価値移転の未来：ビットコインの病理の解体とデジタル継承者の戦略的分析（2025-2026年展望）

著者: Masahiro Aoki

ドキュメントID：MT2025-BC-01-001

ORCID ID：0009-0007-9222-4181

所属: Moonlight Technologies 株式会社

文書バージョン	作成日	作成者	概要
Ver 1.0	2025年8月1日	Masahiro Aoki	初版

## 序論：ジェネシスブロックを超えて - デジタル価値の重大な岐路

サトシ・ナカモトのビジョンから生まれたビットコインは、単なる技術的な発明にとどまらず、金融と信頼のあり方に関する思想的革命であった。その独創的な設計、すなわち検閲耐性を持つピアツーピアの電子キャッシュシステムは、中央集権的な管理者を必要としない価値移転の可能性を世界に初めて証明した。しかし、この革命的な概念実証から15年以上が経過した2025年現在、デジタル通貨の領域は、単純なイデオロギー対立（分散化対中央集権化）の時代を終え、より現実的で多面的な競争の時代へと突入している。現在の競争は、どのシステムが技術的に優れているかという単純なものではなく、セキュリティ、効率性、そしてガバナンスという異なるアーキテクチャ上のトレードオフの間で、どの組み合わせが特定のユースケースを支配するかを巡る覇権争いそのものである。

本レポートの目的は、ビットコインが直面する「問題点」を単なる欠陥としてではなく、そのセキュリティと分散化モデルに内在する「特徴」として深く分析することにある。スケーラビリティの行き詰まり、持続不可能性が指摘されるエネルギー消費、決済手段としての実用性を損なう価格変動性、富の極端な集中、そして違法金融への利用という根本的な課題は、ビットコインの設計上のトレードオフから必然的に生じる帰結である。したがって、これらの問題に対する「解決策」とされるものは、単なる修正ではなく、分散化、効率性、そして管理という異なる哲学に基づく、全く新しいトレードオフの選択を意味する。2024年から2025年にかけての重要な出来事、例えば、米国証券取引委員会（SEC）とリップル社との間の長期にわたる訴訟の終結<sup>1</sup>、イーサリアムのレイヤー2エコシステムの成熟<sup>2</sup>、そして世界各国での中央銀行デジタル通貨（CBDC）の実証実験の加速<sup>4</sup>は、この新しい競争フェーズの到来を告げる触媒となっている。

本レポートは三部構成で展開される。第一部では、ビットコインのアーキテクチャに内在する根本的な限界を、最新のデータに基づき多角的に解体し、後の比較分析の基準点を確立する。第二部では、ビットコインの継承者と目される多様な代替システム、すなわちレイヤー2ソリューション、プルーフ・オブ・ステーク（PoS）システム、斬新なアーキテクチャを持つブロックチェーン、連合型コンセンサスモデル、そして中央銀行デジタル通貨（CBDC）を網羅的に比較評価する。最終的に第三部では、これらの分析結果を統合し、デジタル時代の価値移転の未来に向けた戦略的展望を提示する。本レポートは、投資家、政策立案者、企業戦略担当

者といった、デジタル通貨空間における根本的なトレードオフを理解し、情報に基づいた戦略的意思決定を下す必要のある専門家に向けて、データに基づく客観的な分析を提供することを目的とする。

## 第一部：ビットコインのアーキテクチャに内在する根源的な病理の解体

この部では、ビットコインが抱える本質的な限界を、2025年時点のデータと実例に基づき多角的に分析する。ここで明らかになる課題は、後の代替システムを評価するための重要な評価軸となる。これらの課題は、ビットコインの設計上の欠陥ではなく、その核心的な価値提案を維持するために支払われるべき代償として理解されなければならない。

### 第1章 スケーラビリティの行き詰まり：自らの成功に押しつぶされるシステム

ビットコインのスケーラビリティ問題は、その成功がもたらした必然的な帰結であり、その核心には分散化を維持するための意図的な設計上の制約が存在する。

#### 技術的ボトルネックの再訪

ビットコインのスケーラビリティ問題を理解する鍵は、プロトコルにハードコードされた2つの主要な制約にある。第一に、1ブロックのデータサイズが約1MB（技術的には400万ウェイトユニット）に制限されていること<sup>6</sup>。第二に、新しいブロックが生成される間隔が平均して約10分に設定されていることである。これらの制約は恣意的なものではなく、ブロックチェーンのデータサイズ増大を抑制し、個人ユーザーでもフルノード（すべての取引履歴を検証するノード）を運用可能にすることで、ネットワークの分散化を維持するという明確な目的のために導入された設計上の選択である。

しかし、これらの制約は、ビットコインが1秒間に処理できる取引件数（TPS）に厳しい上限を課す。その結果、ビットコインの処理能力は理論上約7TPS程度にとどまり、数万TPSを処理する従来の主要な決済ネットワークとは比較にならないほどの低水準となっている。

#### 2025年の手数料市場

ビットコインの利用が拡大し、取引需要が限られたブロックスペースを超えると、必然的にネットワークの混雑が発生する。このとき、ユーザーは自身の取引を次のブロックに含めてもらうため、マイナー（採掘者）に対してより高い手数料を支払うインセンティブを持つようになる。こうして、手数料を巡る競争、すなわち「手数料市場」が形成される。

この現象は、ビットコインの性質を根本的に変容させる。サトシ・ナカモトが目指した低コストのピアツーピア電子キャッシュシステムは、ネットワークが混雑する局面においては、高コストな決済・送金レイヤーへと姿を変えてしまうのである。2025年のデータは、この現実を浮き彫りにしている。一部の指標では、ピーク時の「トランザクションあたりの平均コスト」が100ドルを超えることも報告されており<sup>7</sup>、別の指標でも平均手数料が数ドルから数十ドルに達することがある<sup>8</sup>。このようなコストは、特に少額決済を行いたいユーザーにとって、取引額を上回る手数料が発生する事態を招き、ビットコインを決済手段として利用する上での致命的な欠点となる。

この混雑の直接的な現れが、未確認取引の待機場所である「mempool」の肥大化である。需要が高い時期には、mempoolのサイズが1ブロックの容量（約1MB）を恒常的に上回り、数MB、時にはそれ以上に膨れ上がることが観測されている<sup>6</sup>。これは、多くの取引が次のブロックに含まれる保証がなく、高い手数料を支払う取引だけが優先的に処理される状況を生み出す。

## 2017年の危機を前例として

このスケーラビリティ問題が最も顕著に表面化したのが、2017年の価格高騰時である。ビットコイン価格の急騰に伴い、取引需要が爆発的に増加し、1MBのブロックサイズ上限を恒常的に上回る事態が発生した。その結果、大量の取引が未確認のまま滞留し、平均取引手数料は数十ドルにまで高騰。ビットコインは日常的な決済手段としての実用性を完全に失った。この出来事は、スケーラビリティ問題が理論上の懸念ではなく、その普及を阻む現実的な制約であることを明確に示した。

## 未解決の思想的対立

この問題に対し、ブロックサイズを単純に拡大するというオンチェーン・スケーリングのアプローチが提案された。しかし、この提案はビットコインコミュニティを二分する激しい思想的対立を引き起こした。ブロックサイズ拡大に反対する陣営は、ブロックが大きくなることでフルノードの運用に必要なストレージや帯域幅が増大し、結果としてノード運用が一部の大手企業や専門業者に集中してしまうことを懸念した。彼らにとって、これはビットコインの最も重要な価値である分散化を損なう、受け入れがたい妥協であった。この対立は最終的に、2017年8月のビットコインキャッシュ（BCH）の誕生という形で、ブロックチェーンの分裂（ハードフォーク）に至った。

この一連の経緯から導き出される結論は、ビットコインの「手数料市場」はバグではなく、その設計から必然的に生まれる「特徴」であるということだ。固定されたブロックスペースという希少な資源に対し、需要が供給を上回れば、価格（手数料）を介した配分メカニズムが機能するのは経済学的な必然である。このメカニズムが、ビットコインのユースケースを根本的に規定する。低コストな日常決済という「電子キャッシュ」の物語は機能不全に陥り、代わりに、その希少なブロックスペースを確保する価値のある高額な取引、すなわち「グローバルな決済レイヤー」としての役割が浮かび上がる。ビットコインは、そのスケーラビリティの限界ゆえに、小口決済システムとして「失敗」したのではなく、高価値の最終決済システムへと「進化した」と解釈できる。この点を理解することが、レイヤー2ソリューションやその他の代替システムがなぜ必要とされるのかを理解する鍵となる。

## 第2章 環境への負荷：プルーフ・オブ・ワークの持続不可能なエネルギーコスト

ビットコインのセキュリティモデルは画期的であったが、その代償として莫大なエネルギー消費という深刻な外部不経済を生み出した。この問題は、ビットコインが社会的に受け入れられる上での最大の障壁の一つとなっている。

## 2025年におけるエネルギー負担の定量化

ビットコインネットワークのエネルギー消費量は、驚異的なレベルに達している。ケンブリッジ大学のビットコイン電力消費指数（CBECI）による2025年の推計によれば、ビットコインの

年間電力消費量は約138 TWhに達し、これは世界全体の電力消費量の約0.5%に相当する<sup>10</sup>。他の推計では150 TWh<sup>11</sup>や、アルゼンチンのような国家の年間消費量に匹敵するとの指摘もある<sup>12</sup>。

この莫大なエネルギー消費を取引1件あたりに換算すると、その非効率性はさらに際立つ。2025年7月時点の計算では、1ビットコインを採掘するために約854,400 kWhの電力が必要とされている<sup>12</sup>。また、取引1件あたりでは約500 kWhが消費されとの試算もあり<sup>10</sup>、これはVISAの決済1件あたりと比較して数百万倍というとてもない規模である<sup>13</sup>。このエネルギー消費に伴う二酸化炭素排出量も年間数千万トンから1億トン近くに上るとされ<sup>10</sup>、ビットコインは世界的な環境汚染の要因の一つとして厳しく批判されている。

## 消費のエンジン：プルーフ・オブ・ワーク（PoW）

この膨大なエネルギー消費は、ビットコインのコンセンサスアルゴリズムであるプルーフ・オブ・ワーク（PoW）に直接起因する。PoWは、悪意のある攻撃者が取引履歴を改ざんすることを経済的に極めて困難にすることで、ネットワークのセキュリティを担保する仕組みである。具体的には、マイナーたちが膨大な計算能力（ハッシュレート）を投入して複雑な数学的パズルを解く競争を行い、最初に解を見つけたマイナーが新しいブロックを生成する権利を得る。この「仕事（Work）」の証明として計算資源、すなわちエネルギーを投下することが、ブロックの正当性を保証する。

ネットワークの価値が上昇するにつれて、マイニングによって得られる報酬（新規発行ビットコインと取引手数料）の価値も高まる。これにより、マイナー間の競争は激化し、より高性能な専用ハードウェア（ASIC）への投資競争、すなわち「ハッシュレート競争」が加速する。さらに、ビットコインのプロトコルは、ブロック生成時間が平均10分に保たれるよう、ネットワーク全体の計算能力に応じてパズルの難易度を自動的に調整する。つまり、どれだけ多くのマイナーが参加し、どれだけ高性能なマシンが投入されても、エネルギー消費が削減されることはなく、むしろ高いレベルで維持され続ける構造になっている。

2024年のビットコイン半減期は、この構造的な問題をさらに悪化させた。半減期により、ブロックあたりの新規発行報酬が6.25 BTCから3.125 BTCに半減した<sup>12</sup>。しかし、ビットコイン価格の上昇に伴い、ネットワーク全体のハッシュレートは下がるどころか、むしろ上昇を続けた（2024年3月の約505 EH/sから2025年7月には894.5 EH/sへ）<sup>12</sup>。その結果、より多くの総エネルギーが、より少ない新規コインを生み出すために費やされることになった。1BTCを生み出すためのエネルギーコストは、半減期前の約105,000 kWhから、半減期後には約854,400 kWhへと劇的に増加したのである<sup>12</sup>。これは、半減期がマイナーの収益性を圧迫し、それを補うためにビットコイン価格が上昇しなければならないというプレッシャーを生む一方で、コインあたりの環境負荷を直接的に増大させるという、構造的なジレンマを浮き彫りにした。

## 「グリーンマイニング」の物語とその限界

ビットコインマイニング業界は、環境負荷への批判に対応するため、より持続可能なエネルギー源への転換を模索している。2025年のCCAFのデータによれば、エネルギーミックスは再生可能エネルギー（43%）、天然ガス（38%）、原子力（10%）、石炭（9%）となっている<sup>10</sup>。特に、他の産業では利用が困難な「座礁資産」と呼ばれる余剰エネルギー（例えば、石油採



掘時に発生するフレアガスや、需要が少ない時期の水力発電）を活用する動きも見られる<sup>11</sup>。

しかし、これらの取り組みには限界がある。依然として化石燃料が大きな割合を占めているだけでなく、たとえ将来的に100%再生可能エネルギーでマイニングが行われたとしても、その膨大なエネルギーをビットコインネットワークが消費すること自体の是非や、高性能なマイニングハードウェアの製造と廃棄に伴う環境負荷といった問題は依然として残る<sup>13</sup>。さらに、クリーンエネルギーをマイニングが消費することで、他の産業や家庭が化石燃料由来のエネルギーを使わざるを得なくなるという機会費用も指摘されている<sup>11</sup>。

PoWにおけるエネルギー消費は、単なる副産物やバグではなく、そのセキュリティモデルの根幹をなす「機能」である。ネットワークの安全性を保証するハッシュレートの高さは、投下されるエネルギーの量と直接的に比例する。つまり、高いエネルギーコストを維持することこそが、攻撃コストを引き上げ、ネットワークを守るための本質的なメカニズムなのである。この事実、深刻なジレンマを生む。セキュリティの観点からは「特徴」であるものが、社会・環境的な観点からは「負債」となる。気候変動対策が世界的な喫緊の課題となる中で、これほど大量のエネルギーを消費するシステムは、社会的な正当性を得ることが極めて難しい。この根源的な矛盾は、各国政府による規制強化や禁止措置のリスクを常に内包しており、ビットコインの将来に大きな影を落としている。そして、この問題こそが、イーサリアムをはじめとする多くのプロジェクトが、よりエネルギー効率の高いPoSへと移行する最大の動機となっているのである。

### 第3章 「価値の保存」のパラドックス：普及を妨げるボラティリティ

ビットコインは「デジタルゴールド」として、インフレヘッジや価値の保存手段としての地位を確立しつつある。しかし、その一方で、資産価値の極端な変動、すなわち高いボラティリティは、ビットコインが本来目指した「電子キャッシュシステム」としての実用性を著しく損なっている。

#### 極端なボラティリティの測定

ビットコインの価格変動の激しさは、他の主要な金融資産と比較して突出している。資産の価格変動リスクを示す指標である「年率換算ボラティリティ（30日）」を見ると、ビットコインはしばしば50%を超える高い水準で推移しており、これは伝統的な株式市場や金と比較して桁違いに大きい<sup>14</sup>。例えば、S&P 500の期待変動率を示すVIX指数が「恐怖指数」と呼ばれ、市場の危機時に30や40といった値をつけることを考えれば、ビットコインの日常的なボラティリティがいかに異常なレベルであるかが理解できる<sup>15</sup>。

金（ゴールド）やS&P 500指数との長期的なパフォーマンス比較は、ビットコインの特性をより鮮明にする。過去10年間の年平均リターンで見れば、ビットコインは他の追随を許さない驚異的な成長を遂げている<sup>16</sup>。しかし、その裏返しとして、標準偏差で測られるリスク（ボラティリティ）もまた極めて高い。2013年から2025年までのデータでは、ビットコインの標準偏差は151.38%に達する一方、S&P 500は13.79%にとどまる<sup>17</sup>。これは、高いリターンの可能性と同時に、壊滅的な損失のリスクも内包していることを意味する。

## 実用性への影響

この極端なボラティリティは、通貨が持つべき3つの機能（価値の保存、交換の媒体、計算の単位）のうち、特に後者2つを著しく阻害する。

- **交換の媒体（Medium of Exchange）として:** 価値が1日で10%も変動する可能性のある通貨を、商品やサービスの決済に用いることは、受け取る側の商人にとっても支払う側の消費者にとってもリスクが高すぎる。
- **計算の単位（Unit of Account）として:** 日々の生活で使われる法定通貨に対して価値が激しく変動するため、商品やサービスの価格をビットコイン建てで表示することは非現実的である。

## 成熟化仮説と新たな相関

ビットコインの支持者の中には、現在の高いボラティリティは資産としての成熟過程にある一時的な現象であると主張する向きもある。市場規模が拡大し、機関投資家の参入が進むにつれて、ボラティリティは徐々に低下していくという「成熟化仮説」である<sup>18</sup>。事実、長期的なボラティリティには低下傾向が見られ、特に2025年現在、実現ボラティリティが歴史的な低水準に近づいているとの分析もある<sup>19</sup>。

しかし、このボラティリティ低下の議論に、2025年には新たな側面が加わった。それは、伝統的な金融市場との相関性の高まりである。特に、ビットコインとS&P 500指数との相関は、一時的に80%に達するなど、非常に高いレベルで推移していることが報告されている<sup>20</sup>。

この現象は、ビットコインの価格形成メカニズムが根本的に変化しつつあることを示唆している。かつては独自の生態系の中で価格が動いていたビットコインが、機関投資家の参入（ETFなどを通じて）により、彼らのポートフォリオにおける「リスクオン資産」として組み込まれた。その結果、金利期待や流動性といったマクロ経済的な要因が、株式市場と同様にビットコインの価格にも直接的な影響を及ぼすようになった。これは、ビットコインが「安全な逃避資産」や「非相関資産」であるという、かつての主要な物語を根底から覆すものである。

ビットコインのボラティリティは、その普及を妨げる悪循環を生み出している。本来の「ピアツーピア電子キャッシュ」という物語が、高いボラティリティによって機能不全に陥った結果、ビットコインの主要な物語は「デジタルゴールド」という「価値の保存」へとシフトした。皮肉なことに、この「価値の保存」という物語が、インフレヘッジや将来の価格上昇を期待する投機的な資金を呼び込み、さらなるボラティリティの源泉となっている。そして今、機関投資家の参入によって伝統的な金融市場と強く相関するようになったことで、そのボラティリティはマクロ経済の変動に増幅されるようになった。グローバルな送金システムとして機能するためには、資産価値の安定性、すなわち低いボラティリティが不可欠であり、それは現在のビットコインが根本的に欠いている特性なのである。

## 第4章 分散化の幻想：富の集中とシステミックリスク

ビットコインは、中央集権的な権力からの解放を掲げ、誰にでも開かれた金融システムとして登場した。しかし、その理想とは裏腹に、ネットワーク上で実現された経済的現実には、極端な

富の集中という深刻な問題を露呈している。

## 不平等の定量化

ビットコインが万人のための民主的な通貨であるという物語は、データによって容易に覆される。経済的な不平等を測る指標であるジニ係数を用いた分析では、ビットコインネットワークの富の分配は非常に不平等であることが示されている。一部の研究では、そのジニ係数は0.94という極めて高い値に達し<sup>21</sup>、別の分析でも82.69%と、多くの現実世界の経済よりも格差が大きいことが示唆されている<sup>22</sup>。

より具体的に見ると、ごく一部のアドレス（通称「クジラ」）が、発行済みビットコインの大部分を保有している。例えば、ある調査では、全アドレスの上位わずか0.01%に満たない約2,000のアドレスが、全体の42%を占めていると指摘されている<sup>23</sup>。また別の分析では、上位0.01%のアドレスが全ビットコインの58%以上を保有しているとの結果も出ている<sup>24</sup>。これらのデータは、ビットコイン経済が一部の巨大なプレイヤーによって寡占されていることを明確に物語っている。この傾向は他の暗号資産にも見られ、例えばイーサリアムでは、1,000から10,000 ETHを保有するクジラのアドレス数が2025年に入ってから増加傾向にある<sup>14</sup>。

## 新たな中央集権的主体

富の集中は、個人のクジラだけでなく、新たな種類の中央集権的主体を生み出している。

- **上場企業:** MicroStrategy社は、2025年時点で628,791 BTCという驚異的な量を保有しており、これはビットコイン総供給量の約3%に相当する<sup>18</sup>。MARA Holdings（約50,000 BTC）やRiot Platforms（約19,000 BTC）といったマイニング企業も、自社のバランスシートに大量のビットコインを蓄積している<sup>15</sup>。
- **国家:** 法執行機関による犯罪収益の押収などを通じて、米国や中国などの政府も相当量のビットコインを保有するに至っている<sup>25</sup>。
- **取引所:** Coinbaseのような大手取引所も、自社の資産として11,000 BTC以上を保有している<sup>18</sup>。

これらの事実は、ビットコインという資産が、本来それが回避しようとしたはずの企業や国家といった中央集権的な主体へと、再び集約されつつあることを意味している。

## 集中がもたらすシステミックリスク

このような富の極端な集中は、ネットワーク全体に複数のシステミックリスクをもたらす。

- **市場操作のリスク:** 「クジラ」は、その巨大な保有量を背景に、意図的に価格を操作することが可能である。彼らの大量売却一つで市場は暴落し、小規模な投資家は大きな損失を被る。
- **分散化の理念の侵食:** ビットコインの所有がプロトコルの直接的な支配権を与えるわけではない。しかし、極端な富の集中は、エコシステムの方向性に対する非公式な影響力を特定のアクターに与える。資金力を背景に、開発コミュニティへの資金提供、メディアへの影響力行使、ロビー活動などを通じて、事実上の支配力を及ぼすことが可能となる。

ビットコインのプロトコルは、取引の検証プロセスにおいて単一の主体が支配することのな

い、見事な分散化を達成した。しかし、そのパーミッションレスなシステムがもたらした経済的な帰結は、皮肉にも富の極端な集中であった。初期の参加者や大規模な投資家が、先行者利益によって莫大な富を蓄積したのである。これにより、中央集権化の所在が、プロトコルの制御から経済的な支配力へと移行した。クジラはプロトコルのルールを一方的に変更することはできないが、価格やエコシステム全体に及ぼす影響力は絶大である。これは、初期の暗号思想が見落としていた重大な盲点、すなわち「プロトコルレベルの分散化は、必ずしも分散化された公平な経済的結果を保証しない」という事実を突きつけている。この現実、後の代替システム、特にプルーフ・オブ・ステーク (PoS) に重大な問いを投げかける。PoSは、プロトコルの権力（検証権）と富（ステークされたコイン）を直接結びつけることで、この富の集中の問題を、ネットワークのセキュリティとガバナンスに対するより直接的な脅威へと昇華させてしまうからである。

## 第5章 影の経済：違法金融と不可避な規制の包囲網

ビットコインの黎明期における魅力の一つは、既存の金融システムの外側で機能する、匿名性の高い決済手段という側面であった。しかし、この特性は犯罪者にとっても魅力的であり、結果としてビットコインはグローバルな規制当局による厳しい監視の対象となった。

### 匿名性の神話と現実

まず、ビットコインが「匿名」であるという一般的な認識は、正確には「偽名（Pseudonymous）」であると理解する必要がある。ビットコインのアドレスは、それ自体が現実世界の個人情報と直接結びついているわけではない。しかし、すべての取引はブロックチェーンと呼ばれる公開台帳に永久に記録され、誰でも閲覧が可能である。

近年、Chainalysisのようなブロックチェーン分析企業の台頭により、この公開台帳上の取引フローを追跡し、複数のアドレスをクラスター化して特定の個人や組織に結びつける技術が飛躍的に進歩した<sup>26</sup>。取引所など、顧客の本人確認（KYC）が義務付けられているサービスを経由した資金の動きを分析することで、偽名のアドレスの背後にいる人物を特定することが、法執行機関にとってますます容易になっている<sup>27</sup>。

## 2024-2025年の違法利用の動向

ビットコインのボーダーレスな性質は、様々な犯罪活動に利用されてきた。

- **ランサムウェア:** ランサムウェア攻撃の身代金支払いにおいて、暗号資産は依然として主要な手段である。2024年の上半期だけで、ランサムウェアによる支払い額は約4.6億ドルに達し、過去最悪の年になるペースで推移している<sup>24</sup>。攻撃者は、より高額な身代金を要求する「ビッグゲームハンティング」戦略に移行しており、2024年には史上最高額となる約7,500万ドルの単一支払いも記録された<sup>24</sup>。かつては追跡が困難とされたが、2021年のColonial Pipeline事件で米司法省が身代金の一部を追跡・押収したように<sup>1</sup>、もはや安全な逃避先ではない。
- **ダークネット市場とテロ資金供与:** 違法薬物などを取引するダークネット市場での決済手段として、ビットコインは広く利用されてきた。また、テロ組織への資金供与にも利用されており、国際的な安全保障上の課題となっている<sup>28</sup>。
- **資金洗浄:** 犯罪者は、ミキサーやクロスチェーンブリッジなどを利用して資金の出所を隠



蔽しようとするが、その手口はますます巧妙化している。一方で、ステーブルコインがその価値の安定性から、違法取引においてビットコインに取って代わるケースも増えている<sup>21</sup>。

グローバルな規制対応：FATFトラベル・ルール

暗号資産の違法利用の拡大は、各国の規制当局、そして国際社会全体による協調的な規制強化を促した。その中心的な役割を担っているのが、マネーロンダリング・テロ資金供与対策（AML/CFT）の国際基準を策定する金融活動作業部会（FATF）である<sup>4</sup>。

FATFは、暗号資産交換業者（VASP）に対して、従来の金融機関と同等のAML/CFT義務を課すことを勧告した。その中でも特に重要なのが、通称「トラベル・ルール」である。2025年6月、FATFはこの規則（勧告16）を更新し、その要件をさらに明確化した<sup>16</sup>。

- **標準化された情報要件:** 1,000米ドル/ユーロを超えるクロスボーダーのP2P送金について、送金人と受取人の氏名、住所、生年月日といった情報を収集し、送金先のVASPと共有することが義務付けられる。
- **責任の明確化:** 決済チェーンのどの段階で誰が情報提供の責任を負うかが明確にされた。
- **実施期限:** これらの変更は、2030年末までに発効することが定められており、業界には明確なコンプライアンスへの道筋が示された<sup>16</sup>。

ビットコインの当初の魅力の一部は、既存の規制された金融システムの制約から自由である点にあった。しかし、まさにその自由さが違法行為を誘発し、結果として国家による介入を不可避なものとした。FATFが主導するグローバルな規制の潮流は、暗号資産を禁止することではなく、既存の金融規制の枠内に取り込むことを目的としている。これは、暗号資産業界に根本的な選択を迫る。主流の経済システムに統合され、広範な普及を達成するためには、トラベル・ルールのような規制を遵守しなければならない。しかし、それはかつての価値提案の中核であった偽名性やパーミッションレスな性質をある程度犠牲にすることを意味する。したがって、将来のデジタル送金システムが直面する問題は、規制される「かどうか」ではなく、「どのように」規制されるかである。この新しい環境においては、純粋な匿名性を追求するシステムよりも、コンプライアンスを前提に設計されたシステム（例えばRippleやCBDC）が構造的な優位性を持つ可能性がある。

表1：ビットコインの根源的な病理とその2025年における顕在化

病理 (Pathology)	技術的根源 (Technical Root Cause)	直接的結果 (Direct Consequence)	ユーザーへの現実的影響 (Real-World Impact)	2025年の主要データポイント (Key Data Point)
スケーラビリティの行き詰まり	1MBのブロックサイズ制限、約10分のブロック	約7 TPSという低い取引処理能力、ネットワーク	高額な取引手数料、長い送金確認時間、少額決	ピーク時の「トランザクションあたりの平均コスト」が100ド

	生成間隔	クの混雑	済への不適合性	ルを超えることが報告された <sup>7</sup> 。
環境への負荷	プルーフ・オブ・ワーク（PoW）コンセンサスメカニズム	膨大な電力消費と計算資源の投入競争	持続不可能性への批判、規制リスクの増大、環境への悪影響	2024年の半減期後、1BTCを採掘するためのエネルギーコストが約854,400 kWhに急増した <sup>12</sup> 。
高いボラティリティ	主に投機によって駆動される価格形成、機関投資家の参入によるマクロ経済との連動	激しい価格変動、価値の不安定性	価値の保存手段としての信頼性低下、決済手段・計算単位としての機能不全	ビットコインとS&P 500指数の相関が一時的に80%に達し、「非相関資産」という物語が揺らいだ <sup>20</sup> 。
富の集中	先行者利益、規模の経済が働くマイニングと投資	一部の「クジラ」や企業による寡占、高いジニ係数	市場操作リスク、分散化理念の形骸化、経済格差の再生産	上場企業のMicroStrategy社が、ビットコイン総供給量の約3%にあたる628,791 BTCを保有している <sup>18</sup> 。
違法金融への利用	偽名性、ボーダーレスな送金、かつての追跡困難性	ランサムウェア、資金洗浄、テロ資金供与での利用	規制当局による厳しい監視、AML/CFT規制の強化（トラベル・ルール等）	FATFが「トラベル・ルール」を更新し、2030年末までの実施を義務付け、暗号資産の金融システムへの統合を加速させた <sup>16</sup> 。

## 第二部：実行可能な後継者の探求：代替システムの比較分析

第一部で明らかになったビットコインの根本的な限界を踏まえ、この部では、それらの課題を克服すべく設計された多様な代替システムを評価する。これらのシステムは、ビットコインとは「全く異なる」アプローチを採用しており、それぞれが独自のトレードオフを選択している。

### 第6章 進化の一步：レイヤー2ソリューションはビットコインを救えるか？

スケーラビリティ問題を解決するアプローチとして、ベースレイヤー（レイヤー1）自体を変更するのではなく、その上に別の層（レイヤー2）を構築するオフチェーン・スケーリングがある。ビットコインにおける代表例がライトニングネットワーク（LN）であり、イーサリアムではロールアップが主流となっている。

## ライトニングネットワークの概念と現状

ライトニングネットワークは、ビットコインのブロックチェーンの外で取引を行うためのプロトコルである<sup>29</sup>。ユーザーは、まず二者間で「ペイメントチャンネル」と呼ばれる取引経路を開設する。このチャンネル開設の取引のみがビットコインのブロックチェーンに記録される。一度チャンネルが開かれれば、その二者間では、ブロックチェーンに記録することなく、何度でも、ほぼ瞬時に、極めて低い手数料でビットコインの送受信が可能になる<sup>23</sup>。チャンネルを閉鎖する際に、最終的な残高のみが再びブロックチェーンに記録される。

LNがもたらす最大の利点は、スケーラビリティとコスト効率の飛躍的な向上である。理論上、毎秒数百万件の取引を処理可能とされ<sup>23</sup>、これまでビットコインでは非現実的だった数円単位のマイクロペイメントが経済的に可能となる。しかし、2025年時点でのLNの普及状況は複雑な様相を呈している。一部のデータでは、公開チャンネルの総容量が2025年初頭に5,000 BTCを超えたと報告されているが<sup>23</sup>、別のデータでは、2023年後半のピークから約20%減少し、4,200 BTC程度になったと指摘されている<sup>31</sup>。LNの支持者は、この公開容量の減少は問題ではなく、取引の多くがプライベートチャンネルに移行した結果であり、実際の利用は増加し続けていると主張している<sup>31</sup>。

しかし、LNは新たな種類の複雑性と課題を抱えている。ペイメントチャンネルの開設・閉鎖、チャンネル内の流動性（資金）の管理は一般ユーザーにとって複雑であり<sup>2</sup>、大規模な送金には相応の資本をチャンネル内にロックアップする必要がある<sup>32</sup>。さらに、ネットワークは流動性が豊富な「ハブ」となるノードを中心に形成される傾向があり、これがハブ・アンド・スポーク型の中央集権的な構造を生み出し、単一障害点や検閲のリスクとなる可能性がある<sup>3</sup>。

## イーサリアムのロールアップ中心アプローチ

一方、イーサリアムは「ロールアップ」を主要なスケーリング戦略として採用している。ロールアップは、多数のトランザクションをオフチェーンで実行し、そのデータを圧縮して単一のトランザクションとしてイーサリアムのメインネットに記録する技術である<sup>33</sup>。これにより、イーサリアム本体のセキュリティを継承しつつ、スループットを大幅に向上させ、ガス代を90%以上削減することができる<sup>2</sup>。

2025年現在、イーサリアムのレイヤー2エコシステムは爆発的な成長を遂げている。Arbitrum、Base、Optimismといった主要なロールアップは、合わせて数百億ドル以上の総預かり資産（TVL）を誇り<sup>2</sup>、その取引量はしばしばイーサリアムのレイヤー1を上回る<sup>35</sup>。Arbitrumだけで120億ドル以上のTVLを記録するなど<sup>36</sup>、巨大な経済圏を形成している。

ビットコインのライトニングネットワーク（状態チャンネル）とイーサリアムのロールアップのアーキテクチャの違いは、スケーリングに対する根本的な思想の違いを反映している。LNは、二者間の「支払い」をスケーリングすることに特化している。その機能は、ビットコインの

ベースレイヤーができること、すなわち価値の移転に限定される<sup>29</sup>。一方、ロールアップは、それ自体が独立したブロックチェーンのように機能し、イーサリアムのセキュリティを借り受けている。これらは独自の仮想マシン（EVMなど）を持ち、複雑なスマートコントラクト、分散型金融（DeFi）、NFTなど、汎用的な「計算」をスケーリングすることができる<sup>38</sup>。

この違いが、両者の経済的な重要性の差を生んでいる。ロールアップは単なる決済ネットワークではなく、巨大なTVLがロックされた分散型経済全体のプラットフォームとなっている。これにより、ロールアップの経済的なポテンシャルと対象市場は、LNよりも桁違いに大きくなっている。イーサリアムのアーキテクチャが、より表現力豊かで価値の高いレイヤー2を可能にした結果、そのエコシステムはイノベーションと資本で活気づいている。対照的に、LNはビットコインのマイクロペイメントという、よりニッチなユースケースに留まっている。これは技術的な優劣の問題ではなく、ベースレイヤーの設計思想がレイヤー2の可能性を規定するという、構造的な帰結なのである。

## 第7章 グリーン革命：プルーフ・オブ・ステークと持続可能なコンセンサス

ビットコインのPoWが抱える膨大なエネルギー消費問題への直接的な回答として登場したのが、プルーフ・オブ・ステーク（Proof-of-Stake, PoS）である。PoSは、コンセンサス形成のメカニズムを根本から変えることで、持続可能なブロックチェーンの実現を目指す。

### PoW対PoS：根本的な転換

PoWとPoSの最大の違いは、ネットワークのセキュリティを担保するために何を「賭ける」かにある。

- **プルーフ・オブ・ワーク (PoW):** ネットワークの外部資源、すなわち計算能力とそれに伴うエネルギーを投下することでセキュリティを確保する。マイナーは物理的なコストを支払ってブロック生成権を争う。
- **プルーフ・オブ・ステーク (PoS):** ネットワークの内部資源、すなわちそのブロックチェーンのネイティブトークンを「ステーク」（担保として預け入れる）することでセキュリティを確保する。バリデータ（検証者）は、自身が保有・ステークするトークンの量に応じて、新しいブロックを生成する権利を得る確率が高まる。悪意のある行動を取った場合、ステークした資産が没収される（スラッシング）罰則があるため、正直に行動するインセンティブが働く。

### ケーススタディ：イーサリアムの「The Merge」

PoSの圧倒的なエネルギー効率を最も雄弁に証明したのが、2022年9月に行われたイーサリアムのPoSへの移行、通称「The Merge」である。このアップグレードにより、イーサリアムネットワークの電力消費量は、一夜にして99.8%以上も削減された<sup>39</sup>。年間消費電力量は、小国一国分に相当するレベルから、ごく一般的なデータセンター数台分へと激減した<sup>41</sup>。これにより、イーサリアムは「持続不可能な技術」という批判を事実上克服し、2025年現在もその恩恵を受け続けている<sup>43</sup>。

### 新たな中央集権化のベクトル：リキッドステーキング

PoSはエネルギー問題を鮮やかに解決するが、それは新たな、そして同様に根深い問題をもた



らす。それは、資本による中央集権化である。PoSシステムでは、ネットワークにおける権力（取引を検証し、報酬を得る権利）が、富（ステークされたトークンの量）と直接的に結びつく。これはしばしば「富める者がますます富む」仕組みと評される。

この問題をさらに加速させているのが、「リキッドステーキング」プロトコルの台頭である。イーサリアムでソロステーキングを行うには、最低32ETH（2025年時点で約64,000ドル相当）という高い資本が必要となる<sup>39</sup>。この参入障壁を低くするため、Lidoのようなプロトコルは、ユーザーから少額のETHを預かり、それらをプールしてステーキングを代行するサービスを提供する。その見返りとして、ユーザーはいつでも取引可能な代替トークン（stETHなど）を受け取る。

この利便性から、Lidoは絶大な支持を集め、2025年時点で880万ETH以上（約370億ドル相当）がLidoを通じてステークされている<sup>25</sup>。これは、ステーキングされた全ETHのかかなりの部分を占め、Lidoをイーサリアムエコシステムにおける巨大な権力主体へと押し上げた<sup>44</sup>。Lidoは複数のノードオペレーターにステークを分散させているものの、プロトコル自体のガバナンス（Lido DAO）が、事実上、ネットワークの将来に大きな影響力を持つ単一の主体となっており、これが新たな中央集権化のリスクとして深刻に懸念されている<sup>45</sup>。

ビットコインにおいて偶発的に発生した経済的な中央集権化が、PoS、特にリキッドステーキングの隆盛によって、プロトコルレベルで制度化され、増幅される危険性がある。これは、ネットワークの権力がハードウェア（マイニングパワー）から資本力（ステーキングパワー）へと移行したことを意味する。PoSはエネルギー問題を解決したが、中央集権化という「問題」を解決したのではなく、その形態を変え、より直接的で根深いものにしないのである。

## 第8章 速度の再定義：ハイスループットブロックチェーンの斬新なアーキテクチャ

ビットコインや初期のブロックチェーンが直面したスケーラビリティの壁を打ち破るため、コンセンサスメカニズムそのものに革新的なアプローチを取り入れた新しい世代のブロックチェーンが登場している。その代表格が、Solanaである。

### SolanaのProof-of-History (PoH)：暗号学的タイムスタンプ

Solanaのアーキテクチャの核心は、Proof-of-History (PoH) と呼ばれる独自の技術にある。PoHは、それ自体がコンセンサスメカニズムではなく、コンセンサスプロセスを劇的に効率化するための「暗号学的タイムスタンプ」または「分散型クロック」として機能する<sup>29</sup>。

PoHは、検証可能な遅延関数（VDF）を用いて、時間の経過を証明する改ざん不可能な一連のハッシュ値を生成する<sup>30</sup>。ネットワーク上のノードは、このハッシュの連なりを参照することで、各トランザクションがどの時点で発生したかを、相互に通信することなく、信頼できる形で確認できる。これにより、コンセンサス形成に必要な通信のオーバーヘッドが大幅に削減され、トランザクションの並列処理が可能となる<sup>38</sup>。

### 2025年のパフォーマンスとトレードオフ

このPoHとPoSを組み合わせたハイブリッドなアーキテクチャにより、Solanaは驚異的なパ

パフォーマンスを実現している。レイヤー1でありながら、理論上のスループットは毎秒数万トランザクション（TPS）を超え、ブロック生成時間は約400ミリ秒という高速性を誇る<sup>26</sup>。2025年1月の高負荷時にも、ネットワークはダウンすることなく、1日数億件のトランザクションを処理し、DEXの取引量がイーサリアムを上回る日もあった<sup>26</sup>。

しかし、この高性能には大きな代償が伴う。それは、バリデーター（検証者）ノードを運用するためのハードウェア要件の高さである。PoHを高速で処理し、大量のトランザクションを検証し続けるためには、高性能なCPU、大容量のRAM、高速なストレージといった、一般的なPCをはるかに超える強力なハードウェアが必要となる。この高いハードウェア要件は、バリデーターになるための参入障壁を引き上げ、結果としてビットコインやイーサリアムと比較してより中央集権的なネットワーク構造を生み出すというトレードオフを抱えている。

このトレードオフの状況は、2025年6月のネットワークヘルスレポートで詳細に報告されている<sup>26</sup>。

- **ナカモト係数:** 20であり、これはネットワークを停止させるために少なくとも20のバリデーターを共謀させる必要があることを意味する。この数値は他の多くのPoSチェーンよりも堅牢であると評価されている<sup>26</sup>。
- **クライアントの多様性:** バリデーターの約92%がAnza社が維持する「Agave」クライアントを使用しており、クライアントの多様性はまだ低い。ただし、Jump Cryptoが開発する高性能クライアント「Firedancer」が約7%のシェアを獲得し、将来的な分散化への期待が高まっている<sup>26</sup>。Firedancerはテスト環境で100万TPSを達成しており、その本格導入が待たれる<sup>47</sup>。
- **ネットワークの安定性:** 過去には頻繁な停止が問題視されたが、2025年6月時点で16ヶ月以上連続で100%のアップタイムを記録しており、安定性は大幅に向上している<sup>26</sup>。ただし、2024年2月には5時間近い停止が発生しており<sup>47</sup>、脆弱性が完全に克服されたわけではない。

Solanaは、ブロックチェーンに対する「シリコンバレー的」アプローチを体現している。ビットコインの哲学が、低いパフォーマンスを許容してでも徹底した分散化を最優先するのに対し、Solanaの設計哲学はその逆である。すなわち、VISAのような中央集権型システムに匹敵するパフォーマンスを達成することを最優先し、そのために必要な分散化におけるトレードオフを受け入れる。このことから、Solanaはビットコインの「デジタルゴールド」というユースケースの直接的な競合ではなく、分散型アプリケーションのための高性能なインフラストラクチャレイヤーとして位置づけられる。それは、イーサリアムの「モジュラー型（L1+L2）」スケーリングロードマップに対する、「モノリシック型（単一L1）」アプローチからの挑戦なのである。

## 第9章 コーポレート台帳：機関投資家金融のための連合型コンセンサス

ビットコインのパーミッションレス（誰でも参加可能）な思想とは一線を画し、より管理された環境で効率性を追求するアプローチが存在する。それが、あらかじめ選定された信頼できる参加者（バリデーター）の集合体によってコンセンサスを形成する「連合型コンセンサス」である。このモデルの代表例が、RippleとStellarである。

## 連合型ビザンチン合意（FBA）モデル

PoWのような計算競争や、PoSのような資本力に基づく選挙ではなく、RippleやStellarのようなシステムは、半信賴的なモデルを採用する。ネットワークの参加者は、信賴できると見なす他の参加者のリストを選び、その信賴の輪の中で合意形成を行う。

- **Ripple (XRP Ledger) と RPCA:** RippleのXRP Ledgerが採用するコンセンサスアルゴリズムは、Ripple Protocol Consensus Algorithm (RPCA) と呼ばれる<sup>37</sup>。このシステムの中核をなすのが、Unique Node List (UNL) である<sup>49</sup>。各バリデーターは、自身が信賴する他のバリデーターからなるUNLを選択する。あるトランザクション群が正当であると認められるためには、これらの重複するUNLに含まれるバリデーターのスーパーマジョリティ（80%以上）が合意に達する必要がある。この設計は、金融機関が求める要件、すなわち速度（3～5秒での決済完了）、スケーラビリティ（毎秒1,500件の処理能力）、そして極めて低いエネルギーコストを実現するために最適化されている。
- **Stellar (XLM) と SCP:** Stellarが採用するStellar Consensus Protocol (SCP) もFBAの一種であるが、より柔軟な信賴モデルを目指している。SCPでは、誰でもバリデーターになることができるが、コンセンサスは「クォーラムスライス」と呼ばれる、各バリデーターが個別に信賴するノードの小グループを通じて形成される。このモデルは、ネットワークが分裂（フォーク）するよりも停止することを選ぶ「安全性（Safety）」を優先する設計となっている。

## ケーススタディ：Ripple対SEC訴訟の終結

この連合型モデルの運命を左右する極めて重要な出来事が、2025年に訪れた。2020年12月から続いていた、米国証券取引委員会（SEC）とRipple Labsとの間の長期にわたる法廷闘争が、ついに終結したのである。2025年8月、SECとリップル社は、控訴を相互に取り下げることによって合意し、この画期的な訴訟は正式に幕を閉じた<sup>1</sup>。

この訴訟の核心は、XRPが未登録の「証券」として販売されたかどうかという点にあった。2023年の連邦裁判所の判決は、リップル社から機関投資家への直接販売は証券の販売にあたる一方、取引所などを通じた一般投資家への販売（プログラマティックセールス）は証券取引にはあたらないという、画期的な判断を下していた。今回の控訴取り下げにより、この判決が事実上確定し、リップル社は1億2500万ドルの罰金を支払うことで和解が完了した<sup>1</sup>。

この結果は、XRPにとって、そして連合型モデル全体にとって、計り知れない意味を持つ。それは、米国内におけるXRPの規制上の地位に、他の多くの暗号資産が享受できていないレベルの「明確性」をもたらしたからである。この法的明確性は、リスクを極度に嫌う銀行や金融機関が、XRP Ledgerを国際送金などのための決済インフラとして採用する上での最大の障壁の一つを取り除いた。

連合型モデルは、ビットコインが持つ速度、コスト、エネルギーといった問題を認識した上で、規制された金融主体にとって「十分に実用的」なシステムを構築するという、意識的な設計上の選択の結果である。これらのシステムは、完全にパーミッションレスでトラストレスなネットワークという理想を犠牲にし、その代わりに、既知の参加者からなる「連合」内での信賴を再導入する。SECとの訴訟の終結は、このアプローチが規制当局と共存可能であることを証明した。これにより、リップルは既存の金融システムに対する革命的な脅威というよりは、

むしろそれをより効率化するための進化的なアップグレード、すなわち新しい「決済ルール」としての地位を確固たるものにしたのである。

## 第10章 国家の逆襲：究極の破壊者としての中央銀行デジタル通貨（CBDC）

これまで議論してきた暗号資産とは根本的に異なる存在として、中央銀行デジタル通貨（Central Bank Digital Currency, CBDC）が登場した。CBDCは、分散型資産ではなく、中央銀行が発行するデジタル形式の負債、すなわち国家の主権が保証する「デジタル現金」である。

### パラダイムシフト

CBDCは、ビットコインが目指した非中央集権的な思想とは正反対の、トップダウンで管理される通貨システムである。その発行主体は国家であり、その目的は金融政策の効率化、決済システムの近代化、そして国家のデジタル主権の確保にある。

### ケーススタディ：デジタル人民元（e-CNY）

CBDC開発競争において、世界を圧倒的にリードしているのが中国である。中国人民銀行が主導するデジタル人民元（e-CNY）は、すでに大規模な実証実験の段階に入っている。

- **広範な実証実験:** 2025年6月時点で、累計取引額は7兆元（約9,880億ドル）に達し、パイロットエリアは17の省と直轄市にまで拡大している<sup>4</sup>。
- **多様なユースケース:** 利用は個人のリテール決済にとどまらず、法人間融資、貿易決済、さらにはスマートコントラクト技術と統合した革新的な応用も進んでいる。例えば、企業のCO2排出権を担保としたデジタル人民元融資などが実現している。
- **地政学的戦略:** 中国政府は、e-CNYを単なる国内決済手段としてではなく、地政学的な戦略ツールと位置づけている。中国人民銀行総裁は、e-CNYが米ドル支配への対抗軸となりうる「多極通貨体制」の構築に貢献するとの考えを示している。

### 西側諸国のアプローチ：デジタルユーロと日本の研究

欧米や日本もCBDCの研究開発を進めているが、そのアプローチは中国とは異なる。

- **デジタルユーロ:** 欧州中央銀行（ECB）は、2025年秋まで続く「準備フェーズ」にあり、デジタルユーロの潜在的な発行に向けた基盤を固めている<sup>51</sup>。ECBの報告書は、プライバシー保護、オフライン決済機能、そして民間仲介機関との協調を重視した「ルールブック」の策定を進めるなど、中国のトップダウン型とは対照的に、より慎重で協調的なアプローチを取っている。銀行の預金流出を防ぐため、保有上限を3,000ユーロに設定することも検討されている<sup>52</sup>。
- **日本の研究:** 日本銀行も、2023年4月からパイロットプログラムを開始し、リテール型CBDCの技術的な実現可能性を検証している<sup>5</sup>。2025年5月の進捗報告書によれば、日本のモデルはユーザーのプライバシーを重視し、顧客情報と取引台帳を分離するアーキテクチャを実験している<sup>5</sup>。また、銀行、フィンテック企業など64の民間事業者からなる「CBDCフォーラム」を設立し、APIサンドボックスを通じてプログラム可能な決済などのユースケースを共同で模索している<sup>5</sup>。

CBDCは、ビットコインが創造したビジョンのアンチテーゼであり、民間の暗号資産にとって



最大の存在的脅威となりうる。ビットコインは、パーミッションレスで検閲耐性のある非国家的な通貨として生まれた。対照的に、CBDCは定義上、パーミッション型で検閲可能、そして国家によって完全に管理される通貨である。

一般の利用者にとって、うまく設計されたCBDCは、暗号資産のボラティリティや複雑性を伴わずに、デジタル決済の利便性（速度、低コスト）を提供するだろう。これは、民間のステーブルコインやビットコインによる決済といったユースケースの多くを陳腐化させる可能性がある。なぜ、不安定なステーブルコインや遅いビットコイン送金を使う必要があるのか？無料で、瞬時に、そして国家によって完全に裏付けられたデジタルドルやデジタルユーロが利用可能になれば。

したがって、送金システムを巡る最終的な競争は、異なる暗号資産間だけの競争ではない。それは、分散型の暗号資産エコシステム全体と、中央集権的で国家が管理するCBDCエコシステムとの間の、マネーの未来のアーキテクチャそのものを賭けた戦いなのである。

## 第三部：統合と戦略的展望

本レポートの最終部では、第一部と第二部の分析結果を統合し、デジタル価値移転の未来に関する高次の戦略的洞察を提供する。

### 第11章 送金のトリレンマ再訪：システム横断評価

デジタル送金システムの世界は、単一の最良の解決策が存在するわけではなく、根本的なトレードオフの関係によって支配されている。この構造を理解するために、「デジタル価値移転のトリレンマ」というフレームワークを提唱する。いかなるシステムも、以下の3つの望ましい特性のうち、2つを同時に達成することはできても、3つすべてを完全に満たすことは極めて困難である。

1. **分散化と検閲耐性 (Decentralization & Censorship Resistance):** 特定の中央集権的な主体に依存せず、誰でも参加可能で、取引が不当に阻止されたり覆されたりしない能力。
2. **スケーラビリティと効率性 (Scalability & Efficiency):** 大量の取引を高速かつ低コスト、低エネルギーで処理する能力。
3. **規制遵守と安定性 (Regulatory Compliance & Stability):** 法的・規制的枠組みに準拠し、価値が安定しており、既存の金融システムとの相互運用性を持つ能力。

### 各システムの比較マッピング

これまで分析してきた各システムを、このトリレンマの枠組み上でマッピングすると、それぞれの設計思想とトレードオフが明確になる。

- **ビットコイン (Bitcoin):** 「分散化と検閲耐性」を最大化するために設計されている。その代償として、「スケーラビリティと効率性」（低速、高コスト、高エネルギー消費）および「安定性」（高ボラティリティ）を犠牲にしている。
- **イーサリアム (PoS):** 「効率性」（特にエネルギー）と「スケーラビリティ」を劇的に改善する。しかし、富の集中がネットワークの支配力に直結するため、「分散化」の質に関する新たな問いを生じさせている。
- **ソラナ (Solana):** 「スケーラビリティと効率性」を極限まで追求する。そのトレードオフ

として、高いハードウェア要件がバリデーターの参入障壁となり、「分散化」の度合いを低下させている。

- **リップル/ステラ (Ripple/Stellar):** 「効率性」と「規制遵守・安定性」を最大化するように設計されている。そのために、パーミッションレスな「分散化」を明確に放棄し、連合型の信頼モデルを採用している。
- **中央銀行デジタル通貨 (CBDCs):** 「効率性」と「規制遵守（管理）」を究極的に実現する。しかし、それは「分散化と検閲耐性」の完全な対極に位置する。

## 詳細分析：イーサリアム レイヤー2の競争

このトリレンマの競争が最も激しく繰り広げられているのが、イーサリアムのレイヤー2（L2）エコシステムである。ここでは、主に「オプティミスティック・ロールアップ」と「ZKロールアップ」という2つの技術が覇権を争っている。

- **オプティミスティック・ロールアップ (Arbitrum, Optimism):** この技術は、「性善説」に基づいている。トランザクションは基本的に正しいものと「楽観的 (Optimistic)」に仮定され、バッチ処理される。もし不正な取引があれば、誰でも「不正証明 (Fraud Proof)」を提出して異議を申し立てることができる「チャレンジ期間」が設けられている<sup>42</sup>。このアプローチの利点は、既存のイーサリアムのスマートコントラクトとの互換性 (EVM 互換性) が高く、開発が比較的容易なことである<sup>40</sup>。その結果、ArbitrumやOptimismは先行者利益を活かし、2025年時点で圧倒的なTVLとdApp数を誇る<sup>36</sup>。しかし、チャレンジ期間があるため、資金の引き出し（ファイナリティ）に最大7日間かかるという欠点がある<sup>40</sup>。
- **ZKロールアップ (zkSync, Starknet):** この技術は、「ゼロ知識証明 (Zero-Knowledge Proof)」という高度な暗号技術を用いる。「証明がなければ信じない」という原則に基づき、すべてのトランザクションバッチが数学的に正しいことを証明する「有効性証明 (Validity Proof)」を生成してL1に提出する<sup>55</sup>。これにより、チャレンジ期間が不要となり、ほぼ瞬時の資金引き出しが可能となる<sup>40</sup>。セキュリティも理論上はより高い。しかし、証明の生成は計算負荷が高く、EVMとの完全な互換性を実現する (zkEVM) のは技術的に非常に複雑である<sup>57</sup>。zkSyncは、ガス代をETH以外のトークンで支払えるようにするなど、ユーザー体験の革新で注目を集めているが、エコシステムの規模ではまだArbitrumに及ばない<sup>57</sup>。

この分析が示すのは、万能な解決策は存在しないという事実である。ビットコインの問題に対する「解決策」とされた各システムは、実際には問題の優先順位を再定義し、異なる目標を追求した結果に過ぎない。したがって、市場は単一の勝者がすべてを獲得するのではなく、異なる目的を持つ異なるシステムが共存し、断片化していく可能性が高い。どの送金システムを選択するかは、もはや技術的な優劣の問題ではなく、ユーザーが検閲耐性を最優先するのか、アプリケーションのための高性能を求めるのか、あるいは低コストで規制に準拠した送金を望むのかという、戦略的な選択の問題なのである。

表2：代替価値移転システムの比較分析

メカニズム	コンセン	エネルギー	セキュリティ	主要な分	理論上の	ファイナ	主要な例
-------	------	-------	--------	------	------	------	------

ム	サス	ギーモデル	ティ原則	散化リスク	スループット (TPS)	リティ	
<b>Bitcoin</b>	プルーフ・オブ・ワーク (PoW)	エネルギー集約型	計算コスト（攻撃には莫大な計算能力が必要）	51%マイニング攻撃、マイニングプールの集中化	低（~7）	確率的（約60分）	Bitcoin
<b>Ethereum</b>	プルーフ・オブ・ステーク (PoS)	エネルギー効率型	経済的コスト（攻撃には大量のステーク資産が必要、スラッシングによる罰則）	富の集中（リキッドステーキングプロトコルへの権力集中）	中～高（数百～数千、L2含む）	経済的（数分）	Ethereum, Cardano
<b>Solana</b>	PoH + PoS	エネルギー効率型	時間の証明（VDFによる取引の順序付け）+ 経済的コスト	バリデーターのハードウェア要件の高さによる中央集権化	超高（50,000+）	ほぼ瞬時（サブ秒）	Solana
<b>Ripple</b>	連合型ビザンチン合意 (FBA)	超エネルギー効率型	信頼のウェブ（選ばれたバリデーター群の多数決による合意）	バリデーターの談合、UNLの集中化	高（~1,500）	決定的（数秒）	Ripple (XRP Ledger), Stellar
<b>CBDC</b>	中央集権型	超エネルギー効率型	国家による主権的保証	単一障害点（中央銀行）、検閲、監視	（設計による）	決定的（瞬時）	Digital Yuan (e-CNY)

表3：イーサリアム レイヤー2エコシステムの比較分析（2025年）

L2ソリューション	ロールアップ種別	TVL (2025年初頭)	主要な特徴	ファイナリティ	主要なユースケース／エコシステムの強み
Arbitrum One	オプティミスティック	~\$12-19B <sup>36</sup>	高いEVM互換性、成熟したエコシステム、不正証明 (Fraud Proofs)	遅い (~7日間)	DeFi (GMX, Aaveなど)、広範なdAppサポート、最大の流動性
Optimism	オプティミスティック	~\$6-9B <sup>36</sup>	OP Stackによるスーパーチェーン構想、RetroPGFによる公共財支援	遅い (~7日間)	DeFi、CoinbaseのBaseチェーンの基盤、エコシステム開発者へのインセンティブ
zkSync Era	ZKロールアップ	~\$6.5B <sup>57</sup>	zkEVM、アカウントアブストラクション (ガス代の柔軟な支払い)、有効性証明	速い (数分～数時間)	ペイメント、UX重視のdApp、将来的なスケーラビリティとプライバシー

第12章 未来の軌道：デジタル価値移転の今後10年のシナリオ

これまでの分析を踏まえ、デジタル価値移転の未来は、単一の技術が支配するのではなく、複数のシステムがそれぞれの特性に応じて役割を分担する、より複雑な様相を呈する可能性が高い。以下に、考えられる3つの主要なシナリオを提示する。

シナリオ1：多極化する世界

最も現実的なシナリオは、異なる特性を持つ複数のシステムが共存する「多極化」した未来である。

- **ビットコイン:** 「デジタルゴールド」としての地位を確立し、国家や企業のインフレヘッジ資産、あるいは究極の価値保存手段として、ニッチながらも重要な役割を担い続ける。



その決済機能は、高額なグローバル決済レイヤーに特化する。

- **イーサリアム:** PoSへの移行により持続可能性を獲得し、その広範な開発者コミュニティとレイヤー2エコシステムのネットワーク効果を背景に、分散型金融（DeFi）やNFTなど、スマートコントラクトの主要なプラットフォームとしての地位を不動のものにする。
- **高性能ブロックチェーン (Solanaなど):** 高速・低コストな処理能力を活かし、Web3ゲーム、分散型SNS、高頻度取引など、高いパフォーマンスが要求される「分散型ウェブ」のアプリケーションレイヤーを支えるインフラとなる。
- **連合型システム (Rippleなど):** 既存の金融システムとの親和性と、SEC訴訟終結による規制上の明確性を武器に、国際送金や証券決済など、規制された金融機関向けの効率的な決済レールとして組み込まれていく。
- **CBDC:** 各国で発行され、国内のリテール決済の主役となる。国民は、ボラティリティや技術的複雑さのない、安全で便利な国家発行のデジタル通貨を日常的に利用する。

このシナリオでは、異なるブロックチェーンや決済システム間での価値の移動を円滑にする「相互運用性（Interoperability）」プロトコルが、極めて重要な役割を果たすことになる。

## シナリオ2：大なる二極化

世界が、二つの並行する金融システムに分かれるシナリオも考えられる。

- **規制された世界:** CBDCと、それに準拠した民間のネットワーク（Rippleなど）が支配する、完全に国家の管理下にある金融システム。取引は効率的で安全だが、プライバシーは限定的で、国家による監視や管理が可能となる。FATFのトラベル・ルールがこの世界の標準となる。
- **自由な世界:** 国家の管理を逃れようとする人々が利用する、真に分散化され、検閲耐性を持つ暗号資産（ビットコインやプライバシーコインなど）が機能する「グレー」または「ブラック」な市場。ここでは、国家の干渉を受けない自由な価値移転が可能だが、規制対象外であるためリスクも高い。

このシナリオは、デジタル空間における自由と管理を巡るイデオロギー対立が、金融システムの構造そのものを二分する未来を示唆している。

## シナリオ3：CBDCによる覇権

国家が発行するCBDCが、その利便性と信頼性から国民生活に深く浸透し、結果として民間の暗号資産のユースケースの大部分を吸収してしまうシナリオである。決済、送金、プログラム可能な支払いといった機能が、国家によって無料で、あるいは極めて低コストで提供されるようになれば、ボラティリティやセキュリティリスクを抱える民間の暗号資産をあえて利用する動機は、純粋な投機目的や非合法活動を除いて大幅に減少する可能性がある。この未来では、暗号資産は金融の主流から追いやられ、一部の愛好家や投機家のためのニッチな存在に留まることになる。

## 結論と戦略的提言

ビットコインのジェネシスブロックから始まった旅は、単なる技術的な議論をはるかに超え、21世紀におけるお金、信頼、そして権力の根源的な性質を巡るグローバルな競争へと発展し

た。ビットコインに代わる「全く別の送金システム」として登場した技術群は、単なる代替案ではない。それらは、価値がデジタルに表現され、移転される未来の世界に対する、それぞれに異なる、そして互いに競合するビジョンそのものなのである。この競争の行方は、我々の経済と社会の未来のアーキテクチャを形作っていくだろう。

## 戦略的提言

- **投資家へ:** デジタル資産市場は、単一の勝者がすべてを獲得する市場ではないことを理解する必要がある。ポートフォリオの構築は、各資産が持つ異なるユースケース（価値の保存、スマートコントラクトプラットフォーム、機関投資家向け決済レールなど）、リスクプロファイル、そして上記シナリオの可能性を考慮して、多様な資産に分散させることが賢明である。
- **政策立案者へ:** 課題は、特定の技術を禁止したり、勝者を選んだりすることではない。イノベーションを促進しつつ、マネーロンダリング、テロ資金供与、金融安定性といったリスクを軽減するための、明確で一貫性のある規制の枠組みを構築することが求められる。特に、CBDCの設計におけるプライバシーの扱いは、今後10年のデジタル社会のあり方を決定づける重要な政治的争点となるだろう。
- **企業へ:** どの技術基盤を選択するかは、ビジネスモデルに完全に依存する。規制の確実性と速度を求めるビジネス（例：金融サービス）は、連合型システムやCBDCとの連携を模索すべきである。一方、グローバルなオーディエンスに向けたパーミッションレスなアプリケーションを構築するビジネスは、イーサリアムのレイヤー2エコシステムやSolanaのようなパブリックブロックチェーンを選択することになるだろう。ビットコインは、依然として企業の財務戦略における価値保存資産としての選択肢であり続ける。

## 引用文献

1. SEC vs Ripple Long-Running Case Officially Ends - Unchained, 8月 11, 2025にアクセス、<https://unchainedcrypto.com/sec-vs-ripple-long-running-case-officially-ends/>
2. The Future Of Cryptocurrency In 2025: Comprehensive Analysis And Forecast, 8月 11, 2025にアクセス、<https://www.barchart.com/story/news/33862286/the-future-of-cryptocurrency-in-2025-comprehensive-analysis-and-forecast>
3. The state of the layer two ecosystem - L2BEAT, 8月 11, 2025にアクセス、<https://l2beat.com/scaling/tvs>
4. China's Digital Yuan: Shifting Global Currency Power, 8月 11, 2025にアクセス、<https://www.orfonline.org/expert-speak/china-s-digital-yuan-shifting-global-currency-power>
5. Japan's CBDC Pilot Advances: Privacy-Focused Architecture and ..., 8月 11, 2025にアクセス、<https://www.udfspace.com/article/5624144985761123.html>
6. Charts - Mempool Size (Bytes) - Blockchain.com, 8月 11, 2025にアクセス、<https://www.blockchain.com/charts/mempool-size>
7. Bitcoin Average Cost Per Transaction - Real-Time & Historic... - YCharts, 8月 11, 2025にアクセス、[https://ycharts.com/indicators/bitcoin\\_average\\_cost\\_per\\_transaction](https://ycharts.com/indicators/bitcoin_average_cost_per_transaction)
8. Bitcoin Average Transaction Fee - Real-Time & Historical Tr... - YCharts, 8月 11, 2025にアクセス、[https://ycharts.com/indicators/bitcoin\\_average\\_transaction\\_fee](https://ycharts.com/indicators/bitcoin_average_transaction_fee)
9. Memory Pool | Waiting Area for Transactions - Learn Me A Bitcoin, 8月 11, 2025にアクセス

- ス、 <https://learnmeabitcoin.com/technical/mining/memory-pool/>
10. Environmental impact of bitcoin - Wikipedia, 8月 11, 2025にアクセス、  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental\\_impact\\_of\\_bitcoin](https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_bitcoin)
  11. Bitcoin mining 2025: Environmental and regulatory concerns - CoinGeek, 8月 11, 2025に  
アクセス、  
<https://coingeek.com/bitcoin-mining-2025-environmental-and-regulatory-concerns/>
  12. The Real Cost of Bitcoin Mining in 2025 [New Research and Data], 8月 11, 2025にアクセ  
ス、 <https://www.compareforexbrokers.com/us/bitcoin-mining/>
  13. Bitcoin boom comes with huge intensifying environmental footprint - Mongabay, 8月 11,  
2025にアクセス、  
<https://news.mongabay.com/2025/06/bitcoin-boom-comes-with-huge-intensifying-environmental-footprint/>
  14. What Crypto Whales are Buying For May 2025 - Mitrade, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.mitrade.com/insights/crypto-analysis/eth/beincrypto-ETHUSDFETUSD-202504210947>
  15. These Companies Own the Most Bitcoins – Are They an Investor's Goldmine or a Risky  
Gamble? - Investopedia, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.investopedia.com/these-companies-own-the-most-bitcoins-are-they-an-investor-s-goldmine-or-a-risky-gamble-11786832>
  16. FATF updates Standards on Recommendation 16 on Payment ..., 8月 11, 2025にアクセ  
ス、  
<https://www.fatf-gafi.org/en/publications/Fatfrecommendations/update-Recommendation-16-payment-transparency-june-2025.html>
  17. Over 56 Million Whale Trades on Binance, Is Bitcoin Headed for Another Correction?, 8月  
11, 2025にアクセス、  
<https://www.mitrade.com/insights/news/live-news/article-3-1011449-20250805>
  18. These 10 publicly-traded companies own the most bitcoin - Quartz, 8月 11, 2025にアクセ  
ス、  
<https://qz.com/bitcoin-ownership-publicly-traded-companies-strategy-tesla-coinbase>
  19. Is Bitcoin's Bull Run Nearing a Top? What the Herd Missed at \$16,000 and is Missing Now,  
8月 11, 2025にアクセス、  
<https://io-fund.com/crypto/bitcoin-bull-run-16k-lesson-todays-risks>
  20. Bitcoin–S&P 500 Correlation Hits 80%, Tying Crypto To Stocks - Mitrade, 8月 11, 2025に  
アクセス、  
<https://www.mitrade.com/insights/news/live-news/article-3-1026112-20250809>
  21. Chainalysis's 2024 Crypto Crime Report | by Tahir | Medium, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://medium.com/@tahirbalarabe2/chainalysis-2024-crypto-crime-report-44b40bceb889>
  22. Analyzing Bitcoin's Gini Coefficient: A Closer Look at on-chain Wealth Distribution, 8月 11,  
2025にアクセス、 <https://www.elementus.io/blog-post/bitcoins-gini-coefficient>
  23. Bitcoin Lightning Network Price Prediction 2025, 2026, 2030: Future Forecast &  
Investment Insights | SimpleSwap, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://simpleswap.io/blog/bitcoin-lightning-network-price-prediction>
  24. 2024 Crypto Crime Mid-Year Update Part 1: Cybercrime Climbs - Chainalysis, 8月 11,  
2025にアクセス、  
<https://www.chainalysis.com/blog/2024-crypto-crime-mid-year-update-part-1/>
  25. Stake with Lido | Lido, 8月 11, 2025にアクセス、 <https://stake.lido.fi/>
  26. Solana Network Health Report: June 2025 | Solana, 8月 11, 2025にアクセス、

- <https://solana.com/en/news/network-health-report-june-2025>
27. XRP Hits \$3.27 After SEC Settlement, New Ripplecoin Mining Contracts Offer Daily Returns, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://insurancenewsnet.com/oarticle/xrp-hits-3-27-after-sec-settlement-new-ripplecoin-mining-contracts-offer-daily-returns>
  28. FATF Updates – June 2025 - FIAU, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://fiaumalta.org/news/fatf-updates-june-2025/>
  29. Understanding Layer 2 Solutions: Lightning Network, Rollups, & More | MyBTC.ca, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://mybtc.ca/article/understanding-layer-2-solutions-lightning-network-rollups-more>
  30. Bitcoin Lightning vs Ethereum Layer 2: Best For Payments - Sheepy, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.sheepy.com/blog/bitcoin-lightning-and-ethereum-layer-2-explained-which-is-better-for-payments>
  31. Lightning Network Capacity Drops 20% by 2025 | Bitget News, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.bitget.com/news/detail/12560604900663>
  32. Solana's 2025–2026 Outlook: High-Speed Blockchain Faces Big Hopes and Fierce Competition, 8月 11, 2025にアクセス、 <https://b24.am/en/crypto/15683.html>
  33. www.quicknode.com, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.quicknode.com/guides/custom-chains/introduction-to-ethereum-rollups#:~:text=Rollups%20executes%20the%20transaction%20off,of%20actually%20processing%20those%20transactions.>
  34. What are "Rollups" in crypto? - Coinbase, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.coinbase.com/learn/wallet/what-are-rollups-in-crypto>
  35. Ethereum TVL approaches 3-year high — Will ETH price follow? - TradingView, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.tradingview.com/news/coindesktop:1de36e4e9094b:0-ethereum-tvl-approaches-3-year-high-will-eth-price-follow/>
  36. Layer 2 Scaling Stats: Arbitrum, Optimism, and zk-Rollup Growth | PatentPC, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://patentpc.com/blog/layer-2-scaling-stats-arbitrum-optimism-and-zk-rollup-growth>
  37. Why doesn't the lightning network use a rollup or side-chain design as seen with Ethereum L2 infrastructure? : r/btc - Reddit, 8月 11, 2025にアクセス、  
[https://www.reddit.com/r/btc/comments/1au8oug/why\\_doesnt\\_the\\_lightning\\_network\\_use\\_a\\_rollup\\_or/](https://www.reddit.com/r/btc/comments/1au8oug/why_doesnt_the_lightning_network_use_a_rollup_or/)
  38. Ethereum L2 Solutions vs Rollups — Understanding the Difference | by Ground Zero, 8月 11, 2025にアクセス、  
[https://medium.com/@Ground\\_Zero/ethereum-l2-solutions-vs-rollups-understanding-the-difference-a93f5108bac5](https://medium.com/@Ground_Zero/ethereum-l2-solutions-vs-rollups-understanding-the-difference-a93f5108bac5)
  39. Is Ethereum Mining Possible in 2025? Here's What You Need to Know - WunderTrading, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://wundertrading.com/journal/en/learn/article/ethereum-mining>
  40. Optimistic vs ZK Rollups: The Ultimate Layer 2 Showdown - DEV Community, 8月 11, 2025にアクセス、  
[https://dev.to/icyberggenome\\_34/optimistic-vs-zk-rollups-the-ultimate-layer-2-showdown-3f6m](https://dev.to/icyberggenome_34/optimistic-vs-zk-rollups-the-ultimate-layer-2-showdown-3f6m)
  41. Comparing Layer 2 Solutions: StarkEx vs Starknet vs Arbitrum vs Optimism vs zkSync vs



- Polygon | by DeFi Planet, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://defi-planet.medium.com/comparing-layer-2-solutions-starkex-vs-starknet-vs-arbitrum-vs-optimism-vs-zksync-vs-polygon-76615814a8a3>
42. Arbitrum v Optimism v zkSync v Polygon? - LearnCrypto, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://learncrypto.com/knowledge-base/how-to-use-crypto/arbitrum-v-optimism-v-zksync-polygon>
43. 10 Years of Ethereum: Why Architecture Matters More Than Mining After The Merge | by EMCD | Jul, 2025 | Medium, 8月 11, 2025にアクセス、  
[https://medium.com/@emcd\\_io/10-years-of-ethereum-why-architecture-matters-more-than-mining-after-the-merge-be3bfebac2df](https://medium.com/@emcd_io/10-years-of-ethereum-why-architecture-matters-more-than-mining-after-the-merge-be3bfebac2df)
44. Ethereum - DefiLlama, 8月 11, 2025にアクセス、 <https://defillama.com/chain/ethereum>
45. What are the risks of staking with Lido?, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://help.lido.fi/en/articles/5230603-what-are-the-risks-of-staking-with-lido>
46. Solana (SOL) Staking Insights and Analysis: First Half 2025 | Everstake, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://everstake.one/crypto-reports/solana-staking-insights-and-analysis-first-half-of-2025>
47. Solana network went down again – Check live status now - Cryptonary, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://cryptonary.com/solana-network-went-down-again-mainnet-beta-restarts-after-7-hours-of-outage/>
48. Solana Outage History: A Timeline of Network Downtime and Failures - StatusGator, 8月 11, 2025にアクセス、 <https://statusgator.com/blog/solana-outage-history/>
49. What is the difference between Ethereum Roll up and Bitcoin Lightning Network? - Reddit, 8月 11, 2025にアクセス、  
[https://www.reddit.com/r/btc/comments/m2h2oj/what\\_is\\_the\\_difference\\_between\\_ethereum\\_roll\\_up/](https://www.reddit.com/r/btc/comments/m2h2oj/what_is_the_difference_between_ethereum_roll_up/)
50. Digital renminbi - Wikipedia, 8月 11, 2025にアクセス、  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_renminbi](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_renminbi)
51. Preparations for a digital euro continue | Sveriges Riksbank - Riksbanken, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.riksbank.se/en-gb/payments--cash/payments-in-sweden/payments-report-2025/trends-on-the-payments-market/global-trends-in-the-payments-market-/preparations-for-a-digital-euro-continue/>
52. Strengths and limits of the Central Bank's digital euro - Polytechnique Insights, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.polytechnique-insights.com/en/columns/economy/strengths-and-constraints-of-the-central-banks-digital-euro/>
53. Ethereum Rollups: Optimistic and Zero-knowledge Rollups Explained | by OnlyLayer, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://medium.com/@onlylayer/ethereum-rollups-optimistic-and-zero-knowledge-rollups-explained-247607b43193>
54. Arbitrum vs Optimism 2025: Comparing Ethereum's L2 Leaders - Pixelplex.io, 8月 11, 2025にアクセス、 <https://pixelplex.io/blog/arbitrum-vs-optimism/>
55. Ethereum layer 2 scaling solutions: Zero Knowledge and Optimistic rollups explained. | by James Owen | Medium, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://medium.com/@jamesowen.dev/ethereum-layer-2-scaling-solutions-zero-knowledge-and-optimistic-rollups-explained-ab4eebadca76>

56. Zero Knowledge Rollups & Optimistic Rollups: An Overview - Chainalysis, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.chainalysis.com/blog/zero-knowledge-rollups-optimistic-rollups-overview/>
57. Layer 2 Wars: Arbitrum vs. zkSync vs. Starknet – Who's Winning in 2025? | MrJangKen on Binance Square, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://www.binance.com/en/square/post/23565227953033>
58. Which Rollup to Choose for Your Project: Arbitrum, Optimism, Base, ZK EVM, and Others, 8月 11, 2025にアクセス、  
<https://metalamp.io/magazine/article/which-rollup-to-choose-for-your-project-comparing-arbitrum-optimism-base-zkevm-and-others>